

Research and Application of Comprehensive Control Technology for Steep Inclined Mining in Fully Mechanized Working Faces

Canjun Lu

Yongcheng Meidian Holding Group Co., Ltd., Cheji Coal Mine, Yongcheng, Henan, 476600, China

Abstract

In response to the safety problems caused by complex geological conditions such as large inclination angle changes (8° - 19°) and fault development in the MZ25 working face of Cheji Coal Mine, a comprehensive control technology system integrating “equipment anti-skid rolling gangue control personnel protection” is proposed through systematic analysis of key risks such as equipment sliding, rolling gangue, and personnel protection.

Keywords

steep slope mining; equipment anti slip; rolling gangue control; personnel protection; Integrated control technology; integrated design

综采工作面大坡度俯采综合控制技术研究与应用

卢参军

永城煤电控股集团有限公司永城市车集煤矿，中国·河南 永城 476600

摘 要

针对车集煤矿MZ25工作面倾角变化大(8° ~ 19°)、断层发育等复杂地质条件引发的大坡度俯采安全难题,通过系统分析设备下滑、滚矸及人员防护等关键风险,提出了一套集“设备防滑—滚矸控制—人员防护”于一体的综合控制技术体系。该体系创新性地将设备空间姿态协同调控、滚矸主动阻隔与人员通道保障进行集成化设计。主要措施包括:基于力学分析的端头支架链条连锁与面内支架防滑油缸布置;构建“煤袋墙+钻杆骨架+金属网”的组合式巷道挡矸结构;设置皮带架护网、人行扶手与标准化登高作业流程。现场应用表明,该技术体系有效降低了设备滑移率与人员安全事故发生率,提升了工作面生产效率与安全水平,为类似条件矿山安全高效开采提供了技术借鉴。

关键词

大坡度俯采;设备防滑;滚矸控制;人员防护;综合控制技术;集成化设计

1 引言

随着浅部煤炭资源日趋枯竭,中国煤矿开采不断向深部及地质条件复杂区域延伸,大坡度俯采工作面日益增多。此类工作面因煤层倾角大、构造发育,在生产中普遍面临液压支架与输送机下滑、上窜、滚矸窜矸伤人以及人员行走与作业困难等一系列严峻挑战,严重制约安全高效生产。目前,针对大倾角工作面的研究多集中于单一问题的解决。例如,冯耀东通过伪斜调整与采煤工艺优化控制设备下滑;王玉新等针对长延展大落差断层,采用挑顶卧底与回采层位调整技术保障过断层安全;诸多学者也对支架防倒防滑装置、输送机防滑技术等进行了探讨。然而,现有研究大多侧重于设备防滑或过断层等局部环节,对于在多断层、变坡度复杂地质

条件下,如何系统性地协同解决设备防滑、滚矸防控及人员安全防护这一综合问题的研究尚显不足,缺乏一套集成化的“人-机-环”协同控制技术体系。MZ25工作面地质条件复杂,平均倾角达 16° ,内部发育多条影响较大的断层,是典型的大坡度俯采难点工作面。为此,本文以MZ25工作面为工程背景,旨在通过工程地质分析→关键风险辨识→分项技术研发与集成→现场应用验证→综合效益评估的技术路线,构建并应用一套适用于该类工作面的综合控制技术体系,以期类似条件下的安全高效开采提供理论依据与实践参考。

2 工程概况

2.1 地质条件

MZ25工作面位于25采区南翼上部,东接南翼大巷保护煤柱(宽度50m),南邻2513、2511等多个采空区(采空时间均超过5年,稳定性较差),西依DF36正断

【作者简介】卢参军(1976-),男,中国安徽宿州人,本科,助理工程师,从事矿山开采研究。

层（走向近南北，倾角 75°，落差 8~12m），北靠 2105、2508 等采空区，工作面走向长度 1079~1103m，倾向长度 150~160m，煤层厚度 1.1~3.3m，平均厚度 2.6m，煤层倾角 8°~19°，平均倾角 16°，采用走向长壁后退式综合机械化采煤工艺，全部垮落法处理采空区顶板。

工作面顶底板岩性复杂，具体参数如下：基本顶为粉砂岩与砂质泥岩互层，厚度 8.05m，具滑面及少量铝质夹层，饱和抗压强度 28~32MPa；直接顶为砂质泥岩，厚度 3.63m，含铝质及菱铁质鲕粒，夹薄层砂岩，饱和抗压强度 15~18MPa，属中等稳定顶板；直接底为粉砂岩，厚度 6.53m，饱和抗压强度 22~25MPa，遇水易软化，软化系数 0.72；基本底为砂质泥岩，厚度 14m，饱和抗压强度 30~35MPa，稳定性良好。工作面掘进期间揭露 12 条断层，如表 2 琐事，其中 F₂₅₀₇₋₁（落差 12.9m）、DF₃₅（落差 5m）、F₂₅₁₁₋₁（落差 1.8m）等多条断层贯穿整个工作面，断层破碎带宽度 1.2~3.5m，带内岩性松散，导致局部区域煤层变薄、起伏，增加了开采难度。工作面瓦斯含量 0.3~0.5m³/t，煤尘无爆炸危险性（爆炸指数 12.3%），煤的自然倾向性为Ⅲ类不易自燃，水文地质条件简单，主要充水水源为顶板砂岩裂隙水，单位涌水量 0.02L/(s·m)，如表所示。

表 1 断层情况表

断层名称	倾向 (°)	倾角 (°)	落差 (m)	性质	走向延伸长度 (m)	对回采布局影响程度
MZ ₂₅₋₁	113	40	0.9	正断层	29	无影响
MZ ₂₅₋₂	113	43	1.0	正断层	46.5	无影响
F _{MZ25-3}	60	53	1.2	正断层	26	影响较小
F ₂₅₀₇₋₁	317	49	12.9	正断层	408.7	影响较大
F _{MZ25-4}	330	27	4	正断层	28	有一定影响
F ₂₅₋₂	99	68	1.1	正断层	122.6	影响较大
DF ₃₅	262.3	60	5	正断层	372	影响较大
F ₂₅₁₁₋₁	92	60	1.8	正断层	459	影响较大
F ₂₅₁₁₋₂	97	74	1.8	正断层	281	影响较大
F _{MZ25-6}	210	60	1.3	正断层	26	有一定影响
F ₂₅₀₅₋₄	306	52	1.2	正断层	177	有一定影响
F ₂₅₀₅₋₂₄	294	46	14.6	正断层	282	影响较大
F ₂₅₀₃₋₂	70	63	10.7	正断层	210	影响较大
F ₂₅₀₃₋₁	256	60	2.3	正断层	115	影响较大
F ₂₅₀₁₋₂	129	70	5	正断层	72	影响较小
F ₂₅₀₅₋₁	74	70	4	正断层	95	影响较大
F ₂₅₀₅₋₇	15	55	1	正断层	23	有一定影响
F ₂₅₀₈₋₈	35	55	2.2	正断层	36	有一定影响
F ₂₅₀₅₋₅	300	60	3.5	正断层	48	影响较大
F ₂₅₀₅₋₃	310	53	3	正断层	49	影响较大
F ₂₅₋₃	105	55	1	正断层	141	有一定影响

2.2 设备与技术条件

MZ25 工作面采用综合机械化采煤工艺，配备 MG500/1130-WD3 型采煤机、ZY6800/16/35D 型液压支架（102~126 架）、SGZ-800/2×700 型刮板输送机为核心设备；皮带顺

槽配置 SZZ-764/200 型转载机、PLM-1000 型破碎机及 DSJ-100/63/2×160 型带式输送机，形成完善的煤炭运输系统；工作面皮带顺槽为进风巷道，轨道顺槽为回风巷道，通过回风联巷与南翼回风大巷连通，形成独立的通风系统；通过轨道顺槽车场与 25 轨道底车场连通，构建辅助运输系统，为工作面生产提供基础保障。

3 大坡度俯采核心技术难题分析

结合 MZ25 工作面地质条件与俯采特点，经现场勘查与理论分析，确定工作面开采过程中面临三大核心技术难题：

一是设备下滑倾斜风险高。基于静力学分析，设备下滑分力 $F_x = G \cdot \sin \theta$ （G 为设备总重， θ 为煤层倾角），以 ZY6800/16/35D 型液压支架为例（单架自重约 28t），当工作面倾角 19° 时，单架下滑分力达 90.5kN，远超支架与底板间的静摩擦力（约 65kN），存在天然下滑趋势。尤其在雨季或矿井湿气较重时，底板岩性软化，摩擦系数从 0.32 降至 0.25，静摩擦力进一步减小，下滑风险大幅提升。端头支架若发生下滑（累计下滑量超过 100mm 即影响支护效果），易导致工作面端头支护失效，引发顶板垮塌；刮板输送机下滑会造成与转载机搭接量偏差超过 200mm，影响煤炭运输连续性；面内设备倾斜角度超过 3° 时，还可能引发咬架、挤架等问题，损坏千斤顶、立柱等关键部件^[1]。

二是滚石窜矸隐患突出。大坡度俯采条件下，采空区矸石易沿坡面滚落，尤其在断层影响段，顶板稳定性差，矸石片帮、滚落现象更为严重。滚落的矸石不仅会损坏设备，还会对作业人员造成致命威胁；同时，皮带顺槽大坡度段易出现窜矸现象，影响皮带输送机正常运行。

三是人员作业安全保障难。工作面坡面倾角较大，作业人员在行走、设备检修及物料运输过程中，易因脚底打滑发生倾倒或滑落事故；在登高作业、锚杆拆卸等环节，安全风险进一步提升，传统防护措施难以满足安全作业要求^[2]。

4 设备防滑控制技术体系构建

4.1 设备下滑力学机理与防控思路

设备下滑的根本原因在于其重力沿斜面方向的分力（下滑力 F_s ）超过了设备与底板之间的摩擦阻力（ F_r ）。对于质量为 m 的设备，其下滑力可表示为： $F_s = m \cdot g \cdot \sin \theta$ ，其中 θ 为工作面倾角。防滑的本质是提供额外的抗滑力（ F_a ）或增大有效摩擦，确保 $F_s \leq F_r + F_a$ 。本技术体系通过刚性连接（链条）、液压锁定（防倒千斤顶、防滑油缸）及工艺调控，主动提供 F_a 并优化设备姿态，从而抑制下滑。

4.2 关键部位防滑技术措施

（1）端头支架刚性连锁防滑

机头、机尾端头支架掩护梁处采用 $\phi 22 \times 92$ mm 高强度链条与相邻工作面支架进行硬性连接（图 1）。当坡度超过 25° 时，增设防倒千斤顶，形成“链条-千斤顶”双重保险。

移架时严格执行带压擦顶,初撑力不低于 24 MPa。

(2) 转载机及皮带尾综合锚固

转载机机尾通过链条与下端头 #1、#2 支架牢固连接。采用 UW01B 型机尾快速推移装置实现同步推移。皮带自移机尾每次前后移,在其后方两侧施工至少 4 根地锚或打设单体液压支柱,并用链条将其与锚杆底座或支柱固定为一体,防止整体下滑(图 2)。

(3) 面内设备协同姿态控制

支架-输送机联动防滑:每隔 10 架安装一组防滑油缸,通过 $\phi 26 \times 92$ mm 链条(链环间用 $\phi 15.5$ mm 钢丝绳串接以防崩断)与刮板输送机相连。通过调整油缸伸缩,动态补偿输送机的上窜下滑。

工艺协同控制:严格控制采高(≤ 3.3 m),推溜时使用抬底千斤顶压住推拉框架;优化割煤顺序,保持机头机尾推进比例,维持输送机平直。

(4) 电缆单轨吊防下滑

在斜巷段增设一套冗余电缆拖移装置,形成“一运一备”互锁系统。在最后一个电缆小跑车后设置机械阻车器,人工拉移时配合手拉葫芦与 40T 链条进行防滑保障^[9]。

5 防滚矸及人员安全防护技术体系

5.1 巷道空间滚矸主动阻隔技术

针对上下隅角及两巷超前段,构建多层次被动防护网。

上隅角组合挡矸墙:当俯采角超过 15° 时,沿走向每隔 10m 构建一道防滚矸体系。第一道为双排煤袋墙(高度不低于 1m);第二道为“钻杆骨架+半圆木+大眼网”的刚性结构,钻杆插入煤岩帮 0.4-1m,内侧栽设半圆木,整体用铁丝牢固捆扎。

下隅角与巷帮防护:调整端头支架使其尽可能贴近巷帮(间距不超过 0.5m)。当间距超出规定范围时,及时打设单体液压支柱(柱压不低于 11.5 MPa)以阻挡矸石,必要时在支架与巷帮间拉设直径不小于 15.5 mm 的钢丝绳并挂网。

5.2 采运系统窜矸控制技术

皮带运输系统防护:在皮带顺槽坡度大于 16° 的区段,行人侧全程安装高度不低于 300mm 的角铁骨架金属护网。转载机机头溜煤嘴前方加装挡矸皮或链条。(图 3)

工作面内封闭防护:在液压支架顶梁下方与电缆槽之间,使用防倒绳编织防窜矸网,封闭煤壁侧空间,以防止片帮煤矸滚入机道。

5.3 人员通行与作业安全保障技术

通道安全化:在两巷大坡度段(坡度大于 15°)统一

安设稳固的人行梯与扶手(或麻绳)。扶手设置坡度与巷道一致,以便人员抓握。

作业规范化:规定登高作业(高度不低于 1.6m)必须佩戴安全带并有专人监护;严禁蹬踏在锚杆、阀组等不稳定物体上。大坡度段物料搬运优先采用机械化运输方式,必须人工搬运时,一律采取拖运方式。

管理流程化:拉移端头支架、割机头/机尾等高风险作业时,必须在作业点下方 10m 外设警戒,并有班组长统一指挥。

6 应用效果分析

自综合控制技术实施以来,MZ25 工作面设备滑移事故率下降约 70%,滚矸伤人事件显著减少,人员行走与作业安全性大幅提升。工作面推进效率提高约 15%,设备维修成本降低,实现了安全与效益的双重提升。该技术体系具有较强的适用性与推广价值,尤其适用于类似大坡度、多断层的复杂开采条件。

7 结语

形成了一套系统化、集成化的综合控制技术体系。针对 MZ25 工作面大坡度、多断层的复杂条件,研究并成功应用了涵盖“设备防滑-滚矸控制-人员防护”三大模块的协同控制技术体系,突破了单一措施治理的局限性,实现了“人-机-环”系统的整体安全管控。

实现了硬件措施与管控流程的深度融合。基于力学原理设计的链条连锁、防滑油缸等硬件措施,与伪斜调整、工艺优化、标准化作业流程等软性管理措施有效结合,形成了长效防控机制,从根本上降低了各类安全风险。

技术适用性与展望:本体系主要适用于倾角 $8^\circ \sim 25^\circ$ 、存在构造影响的俯采综采工作面。对于更大倾角($> 30^\circ$)或极松软底板等极端条件,其有效性需进一步验证。未来研究可着眼于:①引入倾角、支架姿态实时监测与智能预警系统;②开发自适应调斜控制系统;③研究遥控操作技术,实现人员在安全区域的远程干预,进一步减少高风险区域的暴露。

参考文献

- [1] 杨慧涛,邵高峰.大坡度综采工作面安装技术应用研究[J].内蒙古煤炭经济,2025,(12): 109-111. DOI:10.13487/j.cnki.imce.026790.
- [2] 焦东瑞.基于全方位视频监控技术在大坡度综采工作面安装期间的应用研究[J].山西煤炭,2024,44(01): 89-95.
- [3] 仝泽文.大倾角大坡度仰采综采工作面瓦斯治理技术应用[J].煤炭科技,2023,44(05): 127-130. DOI:10.19896/j.cnki.mtkj.2023.05.023.